EFEK FOTOLISTRIK SEBAGAI BUKTI KUANTISASI CAHAYA DAN FONDASI TEKNOLOGI DETEKSI OPTIK: KAJIAN DESKRIPTIF KUALITATIF

Ardianis Waruwu[1], Elida Weny Rajagukguk[2], Florezita Hosanna Pardede[3], Grace Nurlela Napitupulu[4], Lerin Erzian[5], Ulil Hidayah[6], Ladestam Sitinjak[7], Deo Demonta Panggabean[8]
ardianiswaruwu01@gmail.com[1], elidarajagukguk2022@gmail.com[2], fhosianna013@gmail.com[3], napitupulugrace91@gmail.com[4], lerinerzian289@gmail.com[5], ulilhidayah397@gmail.com[6], ladestamsitinjak@unimed.ac.id[7], deo.panggabean@unimed.ac.id[8]
Universitas Negeri Medan

ABSTRAK

Efek fotolistrik merupakan salah satu fenomena fundamental yang berperan penting dalam perkembangan fisika modern karena menunjukkan bahwa radiasi elektromagnetik tidak selalu dapat dijelaskan hanya melalui pendekatan gelombang klasik. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan karakteristik fisis, interpretasi teoritis, bukti eksperimen, serta relevansi teknologi dari efek fotolistrik melalui kajian deskriptif kualitatif berbasis literatur. Penelitian dilakukan dengan mensintesis buku fisika modern dan artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2021–2026, yang mencakup sumber internasional dan nasional Indonesia. Analisis difokuskan pada hubungan antara energi foton, frekuensi cahaya, fungsi kerja, energi kinetik maksimum, potensial penghenti, serta peran fenomena fotolistrik dalam perkembangan teknologi deteksi optik. Hasil kajian menunjukkan bahwa efek fotolistrik ditandai oleh adanya frekuensi ambang, emisi elektron yang berlangsung hampir seketika, serta ketergantungan energi kinetik maksimum elektron terhadap frekuensi cahaya, sedangkan intensitas cahaya terutama berkaitan dengan jumlah elektron yang dipancarkan. Model foton Einstein memberikan penjelasan yang konsisten melalui hubungan energi $E = hf$ dan persamaan efek fotolistrik $K_{\max} = hf - \phi$. Hasil sintesis teoritis juga menunjukkan adanya hubungan linear antara frekuensi cahaya dan energi kinetik maksimum, sedangkan perbedaan fungsi kerja menyebabkan perbedaan frekuensi ambang pada berbagai material. Literatur terbaru menunjukkan bahwa prinsip efek fotolistrik tetap relevan dalam pengembangan laboratorium virtual, perangkat pembelajaran, photodetector, sistem pencitraan, dan perangkat optoelektronik. Dengan demikian, efek fotolistrik tidak hanya memiliki peran historis dalam perkembangan teori kuantum, tetapi juga tetap relevan secara konseptual dan teknologi dalam perkembangan fisika kontemporer.

Kata Kunci: Efek Fotolistrik, Foton, Teori Kuantum, Fungsi Kerja, Potensial Penghenti, Photodetector.

ABSTRACT

The photoelectric effect is one of the fundamental phenomena that contributed to the development of modern physics by demonstrating that electromagnetic radiation cannot always be described solely as a classical wave. This study aims to describe the physical characteristics, theoretical interpretation, experimental evidence, and technological relevance of the photoelectric effect through a qualitative descriptive literature review. The study synthesized recent physics textbooks and scientific articles published between 2021 and 2026, including international and Indonesian publications. The analysis focused on the relationship between photon energy, incident-light frequency, work function, maximum kinetic energy, stopping potential, and the role of photoelectric phenomena in contemporary optical detection technologies. The literature synthesis shows that the photoelectric effect is characterized by the existence of a threshold frequency, nearly instantaneous electron emission, and the dependence of photoelectron kinetic energy on light frequency rather

than intensity. Einstein's photon model provides a consistent explanation through the energy relation E=hf and the photoelectric equation K_max=hf-ϕ. The synthesized theoretical graph confirms the linear relationship between incident frequency and maximum kinetic energy, while differences in work function shift the threshold frequency among materials. Recent studies further demonstrate that photoelectric principles remain relevant to virtual laboratories, educational instrumentation, photodetectors, imaging systems, and emerging optoelectronic devices. Thus, the photoelectric effect is not only historically significant but also remains conceptually and technologically relevant in contemporary physics.
***Keywords**: Photoelectric Effect, Photon, Quantum Theory, Work Function, Stopping Potential, Photodetector.*

PENDAHULUAN

Perkembangan fisika modern pada awal abad ke-20 ditandai oleh munculnya berbagai hasil eksperimen yang tidak dapat dijelaskan secara memadai menggunakan kerangka fisika klasik. Salah satu fenomena penting dalam perubahan tersebut adalah efek fotolistrik, yaitu peristiwa terlepasnya elektron dari permukaan suatu material ketika material tersebut menerima radiasi elektromagnetik dengan frekuensi yang memenuhi kondisi tertentu. Fenomena ini menjadi salah satu bukti penting bahwa energi radiasi dapat dipertukarkan dalam paket-paket diskret yang kemudian dikenal sebagai foton (Beiser & Cheah, 2020; Prayogi & Selviyana, 2024).

Secara eksperimen, efek fotolistrik menunjukkan beberapa karakteristik yang khas. Elektron dapat dipancarkan hampir tanpa waktu tunda ketika cahaya dengan frekuensi yang sesuai mengenai permukaan material. Selain itu, terdapat frekuensi minimum atau frekuensi ambang yang harus dipenuhi agar emisi elektron terjadi. Energi kinetik maksimum elektron yang dilepaskan juga berkaitan dengan frekuensi cahaya, sedangkan peningkatan intensitas cahaya terutama berkaitan dengan jumlah elektron yang dipancarkan atau arus fotolistrik, selama frekuensi cahaya telah melampaui frekuensi ambang (Zettili, 2022). Karakteristik tersebut menjadi dasar penting dalam memahami mengapa deskripsi klasik tentang cahaya tidak cukup untuk menjelaskan fenomena ini.

Einstein menjelaskan efek fotolistrik dengan mengembangkan gagasan kuantisasi energi yang sebelumnya diperkenalkan dalam pembahasan radiasi benda hitam. Dalam model tersebut, cahaya dipandang sebagai kumpulan foton yang masing-masing memiliki energi sebesar

$$E = hf$$

dengan E merupakan energi foton, h konstanta Planck, dan f frekuensi radiasi. Ketika foton berinteraksi dengan elektron pada permukaan material, energi foton digunakan sebagian untuk melepaskan elektron dari material dan sisanya menjadi energi kinetik elektron. Hubungan tersebut dinyatakan melalui

$$K_{\max} = hf - \phi$$

dengan $K_{\max}$ adalah energi kinetik maksimum elektron dan ϕ adalah fungsi kerja material (Beiser & Cheah, 2020; Felder & Felder, 2023). Hubungan ini juga menghasilkan konsep frekuensi ambang f_0, yaitu

$$f_0 = \frac{\phi}{h}.$$

Artinya, apabila energi foton lebih kecil daripada fungsi kerja material, elektron tidak akan terlepas meskipun intensitas cahaya diperbesar.

Signifikansi efek fotolistrik tidak hanya terletak pada sejarah perkembangan teori kuantum. Fenomena ini juga menjadi dasar pemahaman berbagai perangkat yang mengubah informasi cahaya menjadi sinyal listrik. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa prinsip

fotolistrik tetap berkaitan dengan perkembangan photodetector, sensor cahaya, sistem pencitraan, dan perangkat optoelektronik berbasis material semikonduktor maupun perovskit (Lu et al., 2023; Blinder, 2021; Felder, 2023).

Dalam bidang pendidikan fisika, efek fotolistrik juga termasuk konsep yang relatif abstrak karena mahasiswa harus menghubungkan konsep foton, fungsi kerja, frekuensi, panjang gelombang, energi kinetik, dan potensial penghenti. Penelitian Fagerheim & Bungum (2026). bahwa calon guru fisika masih mengalami kesulitan pada konsep fungsi kerja, stopping potential, serta hubungan antarvariabel dalam eksperimen efek fotolistrik.

Berdasarkan kondisi tersebut, kajian ini bertujuan untuk mendeskripsikan secara sistematis konsep efek fotolistrik mulai dari fenomena eksperimen, penjelasan kuantum, hubungan antarbesaran fisis, hingga relevansinya terhadap perkembangan teknologi deteksi optik dan pembelajaran fisika modern.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode kajian literatur. Pendekatan tersebut digunakan karena tujuan penelitian bukan mengukur fenomena melalui eksperimen baru, melainkan mendeskripsikan, membandingkan, dan mensintesis informasi ilmiah mengenai efek fotolistrik dari berbagai sumber yang relevan.

Sumber data terdiri atas buku teks fisika modern dan fisika kuantum serta artikel ilmiah internasional dan nasional. Buku yang digunakan diterbitkan dalam rentang 2016-2026, sedangkan artikel jurnal yang dianalisis berada dalam rentang 2021–2026. Penelusuran literatur difokuskan pada sumber yang memiliki informasi mengenai konsep efek fotolistrik, eksperimen, pendidikan fisika, simulasi, photodetector, dan aplikasi optoelektronik.

Kriteria pemilihan literatur meliputi:

1. Membahas konsep atau aplikasi yang berhubungan langsung dengan efek fotolistrik;
2. Diterbitkan pada rentang tahun yang ditetapkan;
3. Memiliki identitas bibliografis yang dapat diverifikasi seperti doi atau laman penerbit/jurnal; dan
4. Berasal dari penerbit akademik, jurnal ilmiah, atau portal indeks ilmiah yang dapat ditelusuri.

Analisis dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu identifikasi sumber, seleksi relevansi, ekstraksi informasi, perbandingan temuan, dan sintesis. Informasi yang dikumpulkan kemudian dikelompokkan ke dalam aspek fenomena eksperimen, interpretasi kuantum, hubungan antarbesaran fisis, kesulitan konseptual, dan aplikasi teknologi.

Sebagai bagian dari analisis, hubungan teoritis antara frekuensi cahaya dan energi kinetik maksimum juga divisualisasikan menggunakan persamaan Einstein

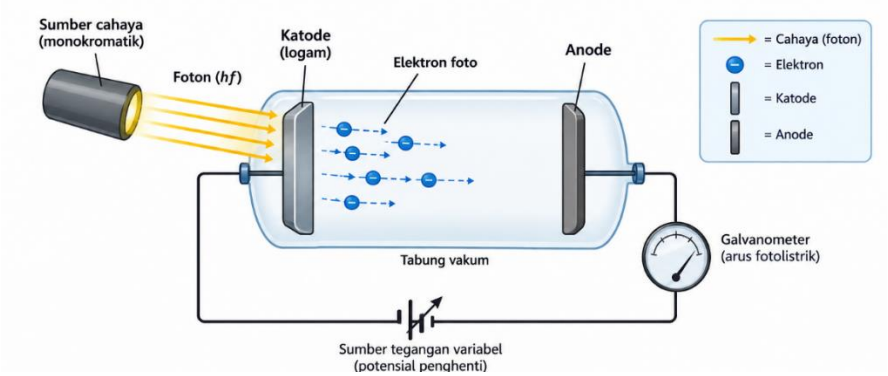
$$K_{\max} = hf - \phi.$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisis Efek Fotolistrik

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa efek fotolistrik memiliki beberapa karakteristik utama yang membedakannya dari prediksi fisika klasik. Karakteristik tersebut meliputi keberadaan frekuensi ambang, emisi elektron yang berlangsung hampir seketika, hubungan energi kinetik dengan frekuensi, serta hubungan intensitas cahaya dengan jumlah elektron yang dipancarkan.

Secara sederhana, mekanisme efek fotolistrik dapat digambarkan sebagai berikut: Cahaya datang → foton berinteraksi dengan elektron → energi foton diserap → sebagian energi digunakan untuk mengatasi fungsi kerja → elektron terlepas → sisa energi menjadi energi kinetik.



Gambar 1. Skema konseptual eksperimen efek fotolistrik

Pada konfigurasi eksperimen, permukaan katode disinari cahaya sehingga elektron dapat terlepas dari permukaan tersebut. Elektron yang dilepaskan kemudian bergerak menuju anode dan menghasilkan arus fotolistrik. Tegangan eksternal dapat diubah untuk menghambat gerakan elektron. Pada kondisi tertentu, arus menjadi nol. Tegangan tersebut disebut potensial penghenti atau stopping potential (Young & Freedman, 2020; Krane, 2019).

Tabel berikut merangkum hubungan antara beberapa besaran penting.

Tabel 1. Hubungan besaran fisis pada efek fotolistrik

Besaran	Perubahan	Dampak utama
Frekuensi cahaya f	meningkat	Energi foton meningkat
Panjang gelombang λ	meningkat	Energi foton menurun
Intensitas cahaya	meningkat	Jumlah foton meningkat
Fungsi kerja ϕ	meningkat	Frekuensi ambang meningkat
Frekuensi ambang f_0	bergantung pada material	Menentukan apakah elektron dapat terlepas
Energi kinetik maksimum	bergantung pada f dan ϕ	Menentukan energi elektron hasil emisi
Potensial penghenti V_s	sebanding dengan $K_{\max}$	Menghentikan elektron paling energetik

Dengan demikian, frekuensi menentukan energi setiap foton, sedangkan intensitas lebih berkaitan dengan jumlah foton yang datang per satuan waktu. Hal ini merupakan salah satu bagian yang sering menimbulkan miskonsepsi dalam pembelajaran efek fotolistrik. Studi Ha dan Jho (2022) menemukan bahwa calon guru fisika masih mengalami kesulitan dalam menghubungkan variabel-variabel tersebut secara tepat.

Oleh karenanya, kesulitan fisika klasik dalam menjelaskan efek fotolistrik menjadi salah satu alasan penting berkembangnya interpretasi kuantum terhadap cahaya. Dalam pendekatan Einstein, cahaya tidak hanya dipandang sebagai gelombang kontinu, tetapi juga sebagai paket energi diskret yang disebut foton.

Energi sebuah foton diberikan oleh

$$E_{\text{foton}} = hf.$$

Ketika foton mengenai permukaan material, energi tersebut digunakan dalam dua bentuk utama. Sebagian energi diperlukan untuk melepaskan elektron dari material, yang disebut fungsi kerja ϕ, sedangkan energi sisanya menjadi energi kinetik elektron. Oleh karena itu,

$$hf = \phi + K_{\max}$$

sehingga

$$K_{\max} = hf - \phi$$

Persamaan tersebut menjelaskan mengapa frekuensi cahaya memiliki peran langsung terhadap energi kinetik elektron. Jika

$$hf < \phi,$$

maka

$$K_{\max} < 0,$$

yang secara fisik berarti elektron tidak dapat terlepas. Kondisi minimum terjadi ketika

$$hf_0 = \phi,$$

sehingga

$$f_0 = \frac{\phi}{h}$$

Hubungan tersebut juga dapat dinyatakan menggunakan panjang gelombang ambang:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\phi}$$

Dengan demikian, material yang mempunyai fungsi kerja lebih besar membutuhkan foton dengan energi lebih tinggi agar efek fotolistrik dapat terjadi.

Penjelasan tersebut konsisten dengan pembahasan dalam buku fisika modern dan analisis konten buku teks yang dilakukan Lee et al. (2023). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar buku teks memperkenalkan efek fotolistrik terutama melalui model foton, tetapi terdapat perbedaan dalam cara buku menjelaskan sejarah, eksperimen, dan interpretasi kuantum fenomena tersebut.

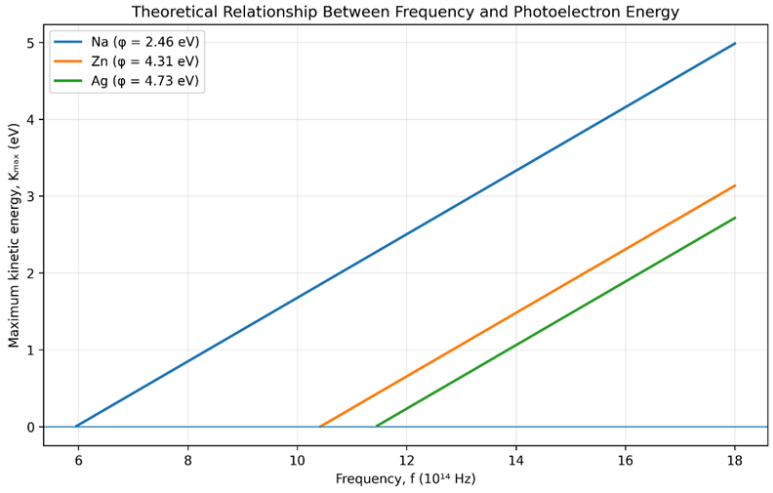
Jho et al. (2023) juga menekankan bahwa pemahaman efek fotolistrik sebaiknya tidak hanya dibatasi pada pernyataan bahwa "cahaya terdiri atas foton". Pemahaman yang lebih lengkap perlu menghubungkan elektromagnetisme, material katode dan anode, distribusi elektron, fungsi kerja, serta kondisi geometris sistem eksperimen.

Sintesis Hubungan Frekuensi dan Energi Kinetik

Berdasarkan persamaan Einstein, hubungan antara frekuensi cahaya dan energi kinetik maksimum dapat divisualisasikan melalui persamaan linear

$$K_{\max} = hf - \phi.$$

Dalam bentuk grafik, kemiringan hubungan antara $K_{\max}$ dan f adalah konstanta Planck h, sedangkan titik potong dengan sumbu frekuensi menunjukkan frekuensi ambang material.



Gambar 2. Hubungan teoritis frekuensi cahaya dengan energi kinetik maksimum elektron

Grafik menunjukkan bahwa setiap material memiliki titik awal emisi yang berbeda karena fungsi kerjanya berbeda. Akan tetapi, setelah frekuensi cahaya melewati frekuensi ambang, peningkatan frekuensi menghasilkan peningkatan energi kinetik maksimum secara linear. Kemiringan garis secara teoritis sama karena ditentukan oleh konstanta Planck.

Hal tersebut juga diperkuat oleh penelitian eksperimen pendidikan di Indonesia. Sokolowski (2021) melaporkan hubungan linear antara stopping potential dan frekuensi cahaya pada perangkat eksperimen efek fotolistrik berbasis LED.Temuan tersebut memperlihatkan bahwa hubungan matematis Einstein bukan hanya konstruksi teoritis, tetapi dapat diamati melalui eksperimen. Penelitian Hamzah et al. juga menunjukkan bahwa media efek fotolistrik berbasis Arduino dapat digunakan untuk memperoleh nilai konstanta Planck yang mendekati nilai teoritis.

Efek Intensitas, Frekuensi, dan Potensial Penghenti

Salah satu hasil penting dari kajian literatur ini adalah perlunya membedakan pengaruh intensitas dan frekuensi cahaya terhadap fenomena efek fotolistrik. Kedua besaran tersebut sama-sama berkaitan dengan radiasi elektromagnetik, tetapi memberikan pengaruh yang berbeda terhadap elektron yang dilepaskan dari permukaan material. Pemahaman terhadap perbedaan ini penting karena hubungan antara intensitas, frekuensi, dan energi elektron merupakan salah satu konsep yang sering menimbulkan kesulitan dalam mempelajari efek fotolistrik.

Jika frekuensi cahaya tetap berada di atas frekuensi ambang suatu material, peningkatan intensitas cahaya berarti semakin banyak foton yang mencapai permukaan material setiap satuan waktu. Setiap foton berinteraksi dengan elektron secara individual, sehingga semakin banyak foton yang datang, semakin besar pula kemungkinan terjadinya interaksi foton-elektron. Akibatnya, jumlah elektron yang dapat dilepaskan dari permukaan material meningkat. Peningkatan jumlah elektron yang bergerak menuju anode tersebut menyebabkan arus fotolistrik menjadi lebih besar. Dengan demikian, intensitas cahaya terutama berkaitan dengan banyaknya elektron yang dipancarkan, bukan dengan energi maksimum yang dimiliki oleh masing-masing elektron.

Sebaliknya, energi yang dimiliki oleh setiap foton ditentukan oleh frekuensi cahaya melalui hubungan:

$$E = hf$$

dengan E merupakan energi foton, h adalah konstanta Planck, dan f merupakan frekuensi cahaya. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa energi setiap foton akan semakin besar ketika frekuensi cahaya semakin tinggi. Oleh karena itu, peningkatan frekuensi tidak sekadar menambah jumlah foton yang datang, tetapi meningkatkan energi yang dibawa oleh setiap foton.

Ketika sebuah foton berinteraksi dengan elektron pada permukaan material, sebagian energi foton digunakan untuk mengatasi fungsi kerja material, sedangkan energi yang tersisa diberikan kepada elektron dalam bentuk energi kinetik. Hubungan tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan Einstein:

$$K_{\max} = hf - \phi$$

dengan $K_{\max}$ merupakan energi kinetik maksimum elektron dan ϕ merupakan fungsi kerja material. Berdasarkan persamaan tersebut, dapat dipahami bahwa peningkatan frekuensi akan meningkatkan energi kinetik maksimum elektron selama frekuensi tersebut telah melewati frekuensi ambang.

Hal tersebut juga menjelaskan mengapa peningkatan intensitas dan peningkatan frekuensi menghasilkan akibat yang berbeda. Misalnya, apabila suatu cahaya memiliki frekuensi yang sudah cukup tinggi untuk menyebabkan efek fotolistrik, kemudian

intensitasnya diperbesar, jumlah elektron yang dipancarkan dapat bertambah, tetapi energi kinetik maksimum masing-masing elektron tidak bertambah hanya karena intensitas meningkat. Sebaliknya, apabila intensitas dipertahankan tetapi frekuensi cahaya dinaikkan, energi setiap foton meningkat sehingga energi kinetik maksimum elektron juga meningkat.

Dengan demikian, hubungan kedua besaran tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

- Intensitas → terutama memengaruhi jumlah elektron yang dipancarkan dan besar arus fotolistrik.
- Frekuensi → menentukan energi setiap foton dan energi kinetik maksimum elektron.

Perbedaan tersebut merupakan salah satu bukti penting yang menunjukkan bahwa energi cahaya tidak dapat dipahami hanya sebagai energi gelombang yang terdistribusi secara kontinu. Dalam model kuantum, cahaya terdiri atas foton dengan energi tertentu yang bergantung pada frekuensinya. Oleh karena itu, sebuah foton dengan frekuensi yang lebih tinggi memiliki energi yang lebih besar daripada foton dengan frekuensi yang lebih rendah.

Selain intensitas dan frekuensi, potensial penghenti juga menjadi besaran penting dalam analisis efek fotolistrik. Potensial penghenti merupakan tegangan yang diberikan berlawanan arah terhadap gerak elektron sehingga elektron dengan energi kinetik maksimum tidak lagi mencapai anode. Hubungan antara energi kinetik maksimum dan potensial penghenti dapat dituliskan sebagai:

$$K_{\max} = eV_s$$

dengan e merupakan muatan elektron dan V_s merupakan potensial penghenti. Jika persamaan tersebut digabungkan dengan persamaan Einstein, diperoleh:

$$eV_s = hf - \phi.$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa potensial penghenti bergantung pada frekuensi cahaya dan fungsi kerja material. Semakin tinggi frekuensi cahaya, semakin besar energi kinetik maksimum elektron sehingga diperlukan potensial penghenti yang lebih besar untuk menghentikan elektron tersebut. Sebaliknya, perubahan intensitas pada frekuensi yang sama tidak menyebabkan perubahan yang signifikan pada potensial penghenti karena intensitas tidak menentukan energi maksimum setiap foton.

Konsep ini menjadi bagian penting dalam pembelajaran karena mahasiswa sering menghubungkan intensitas cahaya secara langsung dengan energi elektron. Kesalahan pemahaman tersebut dapat terjadi karena dalam pengalaman sehari-hari cahaya yang lebih terang sering dianggap memiliki energi yang lebih besar secara keseluruhan. Dalam konteks efek fotolistrik, pemahaman tersebut perlu dibedakan antara energi total radiasi dan energi setiap foton. Intensitas berkaitan dengan banyaknya energi yang datang dalam suatu area dan waktu tertentu, sedangkan energi setiap foton ditentukan oleh frekuensinya.

Studi Anastasya et al. (2025) di Universitas Negeri Medan menunjukkan bahwa mahasiswa relatif lebih mudah memahami efek fotolistrik sebagai bukti dualisme cahaya, tetapi aspek eksperimental dan aplikatif masih membutuhkan penguatan. Hal ini menunjukkan bahwa pemahaman konsep tidak cukup hanya melalui penguasaan persamaan, tetapi juga perlu didukung dengan pengalaman mengamati hubungan antara perubahan variabel dan respons sistem.

Temuan serupa juga terlihat dalam berbagai penelitian pendidikan Indonesia. Penggunaan simulasi PhET, misalnya, dilaporkan membantu memvisualisasikan konsep abstrak efek fotolistrik dan mendukung pemahaman mahasiswa (Manalu et al., 2025; Srg et al., 2024). Melalui simulasi, peserta didik dapat mengubah frekuensi, intensitas, dan jenis material secara langsung, kemudian mengamati perubahan jumlah elektron yang dilepaskan maupun perubahan energi elektron. Dengan demikian, hubungan antara konsep teoritis dan fenomena yang diamati dapat menjadi lebih mudah dipahami.

Penggunaan simulasi juga memberikan kesempatan kepada mahasiswa untuk membandingkan kondisi ketika frekuensi berada di bawah dan di atas frekuensi ambang. Pada frekuensi di bawah ambang, perubahan intensitas tidak menghasilkan emisi elektron. Sementara itu, ketika frekuensi telah melampaui ambang, peningkatan intensitas dapat meningkatkan arus fotolistrik. Perbedaan tersebut dapat menjadi pengalaman belajar yang membantu mahasiswa memahami bahwa frekuensi menentukan kemungkinan dan energi emisi, sedangkan intensitas terutama menentukan banyaknya elektron yang dipancarkan.

Penelitian Ahmad dan Prasetyo (2024) juga menunjukkan bahwa virtual laboratory berbasis discovery learning dapat digunakan dalam pembelajaran efek fotolistrik untuk membantu peserta didik mengeksplorasi konsep sekaligus mengembangkan sikap ilmiah. Lingkungan virtual memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk melakukan pengamatan, mengubah variabel, membandingkan hasil, dan menarik kesimpulan berdasarkan fenomena yang diamati. Dengan pendekatan tersebut, pembelajaran efek fotolistrik tidak hanya berfokus pada menghafalkan persamaan $K_{\max} = hf - \phi$, tetapi juga pada pemahaman hubungan sebab-akibat antara frekuensi, intensitas, energi foton, energi kinetik, dan potensial penghenti.

Dengan demikian, hasil kajian menunjukkan bahwa pemahaman efek fotolistrik akan lebih lengkap apabila intensitas, frekuensi, dan potensial penghenti tidak dipelajari secara terpisah, tetapi dipahami sebagai besaran yang saling berkaitan dalam proses interaksi foton dengan elektron. Frekuensi menentukan energi masing-masing foton dan berpengaruh terhadap energi kinetik maksimum elektron, intensitas memengaruhi jumlah elektron yang dipancarkan ketika frekuensi telah memenuhi kondisi ambang, sedangkan potensial penghenti digunakan untuk mengukur energi kinetik maksimum elektron. Pemahaman hubungan ketiga besaran tersebut menjadi dasar penting untuk menjelaskan efek fotolistrik secara konseptual sekaligus menghubungkannya dengan kegiatan eksperimen, simulasi, dan penerapan teknologi deteksi cahaya.

Relevansi terhadap Teknologi dan Pembelajaran Fisika

Efek fotolistrik mempunyai relevansi teknologi yang luas karena prinsip dasarnya berhubungan dengan konversi energi cahaya menjadi respons listrik. Perkembangan photodetector modern menunjukkan bahwa interaksi foton dengan material masih menjadi bagian penting dalam teknologi sensor optik.

Perkembangan material semikonduktor dan perovskit, misalnya, telah menghasilkan berbagai jenis photodetector yang dirancang untuk memperoleh sensitivitas tinggi, respons cepat, konsumsi daya rendah, serta kemampuan mendeteksi rentang panjang gelombang tertentu. Kajian Hidayati dkk (2024) menunjukkan perkembangan pesat array photodetector berbasis perovskit, sementara Lin (2023) membahas photodetector perovskit yang dapat digunakan dalam sistem pencitraan.

Ren (2023) menunjukkan pengembangan photodetector perovskit fleksibel untuk pencitraan cahaya lemah dan sensor wearable. Perkembangan tersebut memperlihatkan bahwa prinsip interaksi cahaya dan elektron yang dipelajari melalui efek fotolistrik masih memiliki relevansi terhadap teknologi optoelektronik kontemporer.

Selain aplikasi teknologi, efek fotolistrik juga memiliki relevansi kuat terhadap pendidikan fisika. Penelitian Az-zahra et al. (2024) membandingkan virtual laboratory PhET dan applet dalam pembelajaran efek fotolistrik dan menunjukkan bahwa keduanya dapat digunakan sebagai lingkungan pembelajaran alternatif, dengan karakteristik keunggulan yang berbeda. Nadiyyah et al. (2025) juga membandingkan PhET dan Amrita VLab untuk eksperimen efek fotolistrik dan menemukan bahwa keduanya dapat mendukung keterampilan proses sains dengan karakteristik yang berbeda.

Tabel 2. Sintesis hasil kajian literatur

Aspek kajian	Hasil sintesis
Fenomena dasar	Elektron dilepaskan dari material akibat interaksi dengan radiasi yang memenuhi syarat frekuensi
Energi foton	Ditentukan oleh $E = hf$
Fungsi kerja	Energi minimum yang diperlukan untuk melepaskan elektron
Frekuensi ambang	$f_0 = \phi/h$
Energi kinetik maksimum	$K_{\max} = hf - \phi$
Intensitas cahaya	Terutama berkaitan dengan jumlah foton dan arus fotolistrik
Frekuensi cahaya	Menentukan energi foton dan energi kinetik maksimum
Potensial penghenti	Berkaitan dengan energi kinetik maksimum elektron
Pendidikan	Konsep abstrak sehingga simulasi dan eksperimen virtual dapat membantu visualisasi
Teknologi	Berkaitan dengan sensor cahaya, photodetector, pencitraan, dan optoelektronika
Tantangan konseptual	Kesulitan membedakan peran intensitas, frekuensi, fungsi kerja, dan stopping potential

KESIMPULAN

Kajian deskriptif kualitatif ini menunjukkan bahwa efek fotolistrik merupakan fenomena fundamental yang memberikan bukti penting bagi kuantisasi cahaya dan perkembangan fisika kuantum. Karakteristik berupa keberadaan frekuensi ambang, emisi elektron yang berlangsung hampir seketika, serta ketergantungan energi kinetik maksimum terhadap frekuensi tidak dapat dijelaskan secara memadai hanya melalui gambaran klasik tentang cahaya.

Interpretasi Einstein memberikan kerangka yang konsisten melalui konsep foton dengan energi $E = hf$ dan persamaan

$$K_{\max} = hf - \phi.$$

Persamaan tersebut menjelaskan hubungan antara frekuensi cahaya, fungsi kerja material, dan energi kinetik elektron. Sintesis teoritis juga menunjukkan hubungan linear antara frekuensi cahaya dan energi kinetik maksimum, sedangkan perbedaan fungsi kerja menyebabkan perbedaan frekuensi ambang pada setiap material.

Kajian juga memperlihatkan bahwa efek fotolistrik tetap relevan dalam pendidikan dan teknologi. Dalam pendidikan, simulasi dan virtual laboratory dapat membantu memvisualisasikan konsep yang abstrak, sedangkan dalam teknologi, prinsip interaksi cahaya dan elektron menjadi bagian penting dalam pengembangan photodetector, sensor, sistem pencitraan, dan perangkat optoelektronik.

Dengan demikian, efek fotolistrik dapat dipahami bukan hanya sebagai materi historis dalam perkembangan fisika modern, tetapi sebagai konsep yang menghubungkan teori kuantum, bukti eksperimen, pembelajaran fisika, dan perkembangan teknologi optik modern.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, L. S., & Prasetyo, Z. K. (2024). Discovery learning-based virtual laboratory in physics education as an effort to enhance students' scientific attitudes. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 10(3), 1433–1441.

Anastasya, P., Situmorang, S., & Herawati, T. (2025). Analisis pemahaman mahasiswa terhadap konsep efek fotolistrik pada mata kuliah fisika kuantum. Mimbar Kampus: Jurnal Pendidikan dan Agama Islam, 24(1), 53–59.

Az-zahra, P. L., Rohim, F., Amarulloh, R. R., Nanto, D., & Herpi, A. N. (2024). Comparative study

between virtual laboratory PhET Colorado versus applets in photoelectric effect. Kasuari: Physics Education Journal, 7(2), 289–299.
Beiser, A., & Cheah, K. W. (2020). Concepts of modern physics. McGraw-Hill Education Korea.
Blinder, S. M. (2021). Introduction to quantum mechanics (2nd ed.). Academic Press.
Fagerheim, S. O. H., & Bungum, B. (2026). The story of the photoelectric effect: An intervention study on the use of history and argumentative writing in physics teaching. Research in Science & Technological Education.
Felder, G. N. (2023). Modern physics. Cambridge University Press.
Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). Introduction to quantum mechanics (3rd ed.). Cambridge University Press.
Ha, S., & Jho, H. (2022). Understanding of the photoelectric effect by pre-service physics teachers. New Physics: Sae Mulli, 72(11), 841–856.
Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2021). Fundamentals of physics (12th ed.). Wiley.
Hamzah, H., Sartika, D., & Agriawan, M. N. (2022). Development of photoelectric effect learning media based on Arduino Uno. Indonesian Review of Physics, 5(1).
Hidayati, A. K., Oktamaypasha, R., & Rini, S. B. I. (2024). DIY innovations in quantum physics: Proving light dualism with photoelectric effect and double slit experiments. Jurnal Pendidikan dan Ilmu Fisika, 4(1).
Jho, H., Lee, B., Ji, Y., & Ha, S. (2023). Discussion for the enhanced understanding of the photoelectric effect. European Journal of Physics, 44(2), 025301.
Krane, K. S. (2019). Modern physics (4th ed.). Wiley.
Lee, B., Ha, S., Jho, H., & Ji, Y. (2023). Content analysis of the photoelectric effect presented in introductory physics textbooks. New Physics: Sae Mulli, 73(3), 229–241.
Lin, L. (2023). Self-powered perovskite photodetector arrays with asymmetric contacts for imaging applications. Advanced Electronic Materials, 9(10), 2300106.
Lu, H., Wu, W., He, Z., Han, X., & Pan, C. (2023). Recent progress in construction methods and applications of perovskite photodetector arrays. Nanoscale Horizons, 8, 1014–1033.
Manalu, A. M., Sinaga, C. A., & Patra Hs, R. A. (2025). Meningkatkan pemahaman konsep mahasiswa pendidikan fisika terhadap materi efek fotolistrik. Mimbar Kampus: Jurnal Pendidikan dan Agama Islam, 24(1), 36–42.
Nadiyyah, K., Aprianti, R., & Nisa, U. K. (2025). Comparative analysis of students' science process skills using virtual laboratory in photoelectric effect experiments. U-Teach: Journal Education of Young Physics Teacher, 6(1), 17–25.
Prayogi, S., & Silviana, F. (2024). LED lights of various colors for comprehending the photoelectric effects phenomena. Majalah Ilmiah Teknologi Elektro, 22(2), 243–248.
Ren. (2023). Enabling low-drift flexible perovskite photodetectors by electrical modulation for wearable health monitoring and weak light imaging. Nature Communications, 14, 4961. DOI: 10.1038/s41467-023-40711-1.
Sokolowski, A. (2021). Enabling covariational reasoning in Einstein's formula for photoelectric effect. Physics Education, 56, 035029.
Srg, F. M., Waluyo, F., Febriani, L., & Syakila, M. (2024). Pengembangan media pembelajaran berbasis simulasi efek fotolistrik untuk memahami fenomena kuantum. Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran, 7(4), 18786–18795.
Young, H. D., & Freedman, R. A. (2020). University physics with modern physics (15th ed.). Pearson.
Zettili, N. (2022). Quantum mechanics: Concepts and applications (3rd ed.). Wiley.